

# ÍNDICE MEMORIA

<b>Resumen</b>	<b>3</b>
<b>Resum</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>7</b>
<b>Capítulo 1: Introducción</b>	<b>9</b>
1.1. Objeto	9
1.2. Alcance	10
1.3. Antecedentes	10
<b>Capítulo 2: Documentación sobre lo sucedido</b>	<b>13</b>
2.1. Sucesos	13
2.2. Controles realizados en el parque de atracciones Tibidabo	16
2.3. Empresas involucradas en el caso	18
2.4. Histórico de averías sufridas por el Péndulo	19
2.5. Datos útiles de cara a la reconstrucción del Péndulo	20
2.5.1. Posibles hipótesis	21
2.5.2. Dimensiones, elementos de la estructura y cinemática	22
2.6. Información actual	23
<b>Capítulo 3: Descripción de la estructura y sus elementos</b>	<b>27</b>
3.1. Placa de anclaje	29
3.2. Base inferior	30
3.3. Base intermedia	32
3.4. Base superior	32
3.5. Brazo	34
3.6. Góndola	34
3.7. Aspecto final	36
<b>Capítulo 4: Análisis por elementos finitos de la estructura</b>	<b>38</b>
4.1. Placa de anclaje	39
4.2. Base inferior	39
4.3. Base intermedia	41

4.4. Base superior .....	42
4.5. Brazo .....	42
4.6. Góndola.....	43
<b>Capítulo 5: Presupuesto general.....</b>	<b>45</b>
<b>Capítulo 6: Conclusiones .....</b>	<b>48</b>
<b>Capítulo 7: Bibliografía .....</b>	<b>56</b>
7.1. Referencias bibliográficas.....	56
7.2. Bibliografía de consulta .....	56
7.3. Referencias web.....	57

## **RESUMEN**

En el presente proyecto se ha desarrollado un exhaustivo estudio acerca de las posibles causas que provocaron el colapso de la atracción denominada el Péndulo ubicada en el parque de atracciones Tibidabo el mes de Julio de 2010 causando la muerte de una niña de 15 años. Esta atracción fue inaugurada en Agosto del 2006, por lo que tuvo una duración total de tan solo 4 años.

En el estudio realizado, se analizan con todo lujo de detalle las hipótesis más probables que pudieron suceder focalizando las causas del colapso a la precarga aportada a los espárragos que unían el fuste con el suelo y la presencia de corrosión en los mismos.

Debido a que el caso está actualmente en los tribunales, ha existido desde un primer momento una gran falta de datos la cual ha sido abordada realizando una reconstrucción de toda la geometría que compone el Péndulo, por tanto, todos los datos y conclusiones que se mostrarán serán referenciados al modelo realizado.

## **RESUM**

En el present projecte s'ha desenvolupat un exhaustiu estudi sobre les possibles causes que van provocar el col·lapse de la atracció anomenada el Pèndol situada al parc d'atraccions Tibidabo el mes de Juliol de 2010 provocant la mort d'una nena de 15 anys. Aquesta atracció va ser inaugurada el mes d'Agost de 2006, per tant va tenir una duració total de tan sols 4 anys.

En l'estudi realitzat, s'analitzen amb un gran detall les hipòtesis més probables que van poder succeir focalitzant les causes del col·lapse a la precàrrega aportada als espàrrecs que unien la base del Pèndol amb el sòl i la presencia de corrosió en els mateixos.

Degut a que el cas actualment està en els tribunals, ha existit des d'un primer moment una gran falta de dades la qual ha sigut solucionada realitzant una reconstrucció de tota la geometria que compona el Pèndol, per tant, totes les dades i conclusions que es mostrin, seran referenciades al model realitzat.

## **ABSTRACT**

In this project, it has been done an analysis about the possible causes that could have induced the collapse of the attraction called "el Péndulo" located in the amusement park of Tibidabo that caused the death of a 15 year old girl. This attraction was opened in August of 2006, that indeed is, it lasted for 4 years.

In the analysis carried out, it is analyzed in detail the most probable hypothesis that could have happened focusing the causes of the collapse on the preloaded screws provided to the lower base of "el Péndulo" and the presence of corrosion on the screws.

Because the case is currently in court, from the first moment there has been a great amount of missing data. The missing data which has been solved performing a reconstruction of the whole geometry that makes up "el Péndulo", and therefore all data and conclusions shown have been referenced to the model developed.





## AGRADECIMIENTOS

En general, me gustaría ofrecer mis agradecimientos a todos y cada uno de los profesores que he tenido al pasar por la E.U.E.T.I.B. Sobre todo, aquellos con los cuales he realizando las asignaturas de especialización en la rama mecánica, es decir, desde el departamento de fluidos, mecánica, materiales y en especial el de estructuras / resistencia de materiales. Gracias al conocimiento que se ha ido adquiriendo en todas y cada una de las asignaturas cursadas, el autor del presente proyecto ha sido capaz de realizar y superar todas y cada una de las adversidades que se le han presentado, plasmando sobre el mismo los resultados.

No obstante, agradezco el apoyo para realizar este proyecto de dos personas en concreto, David Sánchez Molina, tutor del trabajo final de grado y Eva Martínez González, profesora del departamento de ingeniería mecánica con la cual gracias a su interés por el proyecto se ha podido dar un valor añadido al mismo ofreciendo algunas pequeñas ideas que marcan la diferencia, se le agradece también algunos de los consejos que se salen fuera del ámbito académico incluso propuestas planteadas para realizar una vez finalizados los estudios.

Finalmente, el autor se reserva un apartado para el profesor citado anteriormente David Sánchez Molina gracias al cual el nivel de conocimientos del autor ha crecido a pasos agigantados no solamente cuando se le tuvo como profesor de la asignatura "Estructuras y Construcciones Industriales" sino también durante el transcurso del presente Trabajo Final de Grado (tratando materias incluso que se salen totalmente de las citadas). Esta evolución comentada no ha sido solamente dentro del ámbito académico sino también en la forma de plantearse algunos aspectos, nuevos puntos de vista a considerar, nuevas expectativas no consideradas anteriormente, interpretación de pequeños detalles que en un primer momento pueden pasar por alto pero sobretodo algunas de las opiniones comentadas durante las horas que se han pasado en su despacho han hecho del autor una gran absorción cual esponja de lo que es el reflejo de un muy buen ingeniero pero sobretodo una excelente persona. El autor le agradece sobretodo que siempre tuviera su puerta abierta.

Como conclusión, comentar un aspecto incorrectamente interpretado por algunos profesores, el improvisar delante de un alumno con unos conocimientos ya avanzados sobre el tema que se está tratando, no es para nada malo, es más se puede aprender una forma de plantear el terreno nunca vista anteriormente y más eficiente debido a que las explicaciones en clase y su resolución de ejercicios, para nada son improvisadas.

Sin más, expreso mis agradecimientos a todos ustedes.

David Carretero Alfaro.

*Estudiante de Grado en Ingeniería Mecánica.*





# CAPÍTULO 1:

## INTRODUCCIÓN

El 16 de Julio de 2010 la atracción denominada como el Péndulo ubicada en el Tibidabo colapsó, esta produjo la muerte de una niña de 15 años y 3 heridos más. Sobre este incidente se han hecho un gran número de valoraciones por diferentes ingenieros, gran parte de ellos no estaban involucrados en el caso por lo que podían explicar las hipótesis que ellos consideraban con total libertad. Además de estas valoraciones comentadas, se han realizado informes periciales encargados por el colegio de ingenieros industriales de Cataluña, en estos se indican las posibles causas de lo sucedido, no obstante y a sabiendas que por los medios de comunicación no puede obtenerse toda la información que uno desea, se tiene la sospecha de que no se ha realizado ningún cálculo de manera detallada que intente demostrar objetivamente lo sucedido, es cierto que se han realizado valoraciones acerca del estado de los espárragos y demás elementos presentes en las construcciones anexas, es decir, del estado en que se encontraba todo justamente después del accidente pero se echa en falta algún documento que demuestre claramente mediante un cálculo minucioso el motivo del colapso de la atracción. Esas son las valoraciones que se obtienen a partir de los datos obtenidos de diferentes medios de comunicación y la sensación que transmite al autor del presente proyecto, en ningún caso se afirma de forma categórica que no exista dicho informe.

### 1.1. Objeto

En el presente proyecto se llevará a cabo el análisis de la atracción del Péndulo la cual falló en 2010. Este, será realizado con las limitaciones que conlleva un proyecto de este estilo, es decir, debido a la confidencialidad del caso, los datos que se han podido obtener por vías diferentes como internet o medios de comunicación ya publicados han tenido que deducirse absolutamente la totalidad de los parámetros, es decir, a partir de unos valores que se han tomado como patrón, obtenidos directamente del plano realizado por Fabbri Group que es la

empresa fabricante de nacionalidad italiana que diseñó el Péndulo. A lo largo del proyecto, se hace constancia de las limitaciones que se han tenido y las hipótesis totalmente razonables que se han tenido en cuenta con la finalidad de subsanar aquellos datos no disponibles. Finalmente se ofrecerán las conclusiones referidas al colapso de la atracción las cuales serán basadas puramente en los cálculos realizados, es decir, siendo totalmente objetivas.

Absolutamente la totalidad de los cálculos intermedios realizados tienen una explicación de que objetivo persiguen y porque se realizan con la finalidad de que el lector pueda seguir amenamente el estudio realizado.

## 1.2. Alcance

Tal y como se ha dicho anteriormente, debido a la falta de un informe (al menos que se haya hecho público) que realice el cálculo de cada uno de los elementos que integran el Péndulo con sus correspondientes datos como inercias, masas, longitudes, etc. En el presente proyecto, se establecerá como finalidad la de calcular la atracción del Péndulo que estaba ubicado en el parque de atracciones del Tibidabo. Cuando se hace referencia a calcular, implícitamente se indica verificar, tal y como se indica en el título del proyecto, es decir comprobar la estructura que existía en ese momento, no obstante y a pesar que se realizará el cálculo de la estructura completa, este proyecto tiene como objetivo centrarse en el anclaje de la atracción el cual falló produciendo el colapso de la estructura y finalmente la muerte de una niña de 15 años y 3 heridos más. Todos los razonamientos que se llevarán a cabo vendrán supervisados por los cálculos realizados en los anexos correspondientes al cálculo de los esfuerzos sobre los espárragos y el análisis a fatiga, es decir, tendrán una explicación demostrable evitando totalmente la subjetividad.

Como aclaración importante, comentar que los resultados obtenidos son basados en el modelo reconstruido del anexo correspondiente a la reconstrucción de la geometría del Péndulo. Es decir, bajo las consideraciones realizadas en el anexo citado, no obstante, esta reconstrucción se ha llevado a cabo de forma muy precisa y minuciosa con la finalidad de obtener la representación más realista posible tal y como se observará en el mismo.

## 1.3. Antecedentes

La motivación y las causas que dan lugar a este estudio es que el autor del mismo, se subió en esta atracción que falló denominada el Péndulo. Una vez alguien ha estado en algún momento dentro de un emplazamiento o elemento mecánico el cual posteriormente falla conllevando la pérdida de la vida de algunas personas, se pregunta cuánto de lejos ha estado de ese accidente, por tanto, ello motiva a uno a determinar objetivamente, es decir, mediante los cálculos correspondientes el buen diseño de la estructura o bien las causas que condujeron a este trágico final.

Este no es el único motivo por el cual se realiza el proyecto sino también la curiosidad por ver los motivos que condujeron a la atracción al colapso y a partir de estos mostrar al resto de ingenieros la importancia de tener en cuenta algunos parámetros en el diseño que si se obvian, pueden producir una catástrofe. Por ello, se avisa a los futuros ingenieros y recuerda a los ingenieros actuales las consecuencias catastróficas que puede conllevar un elemento mecánico de este estilo y animarles a elaborar una construcción como la que trata en el presente proyecto solamente si tienen totalmente la certeza que funcionará sin problemas durante el tiempo útil que se tenga pensado ponerla en funcionamiento.



# CAPÍTULO 2:

# DOCUMENTACIÓN SOBRE

# LO SUCEDIDO

En el siguiente capítulo se agrupará toda la información que se ha recopilado a través de varios medios de comunicación como periódicos, televisiones, internet, etc. Resulta muy útil disponer de un apartado en el cual se obtenga la información más relevante acerca de los sucesos debido al gran colapso de información repetida sobre el suceso que puede hallarse por internet impidiendo obtener algo de forma ordenada, por ello el autor se ha molestado en ir la recopilando paulatinamente e introducirla de forma ordenada con la finalidad de que el lector pueda obtener una visión clara de lo que sucedió sin que pueda perderse. La estructura del capítulo 2 es primero proporcionar al lector cierta información para saber lo que sucedió, como se realizaban los controles en las atracciones del parque de atracciones del Tibidabo y las personas involucradas en el caso siendo esta de carácter general, posteriormente introduciendo aquellos datos que han sido útiles de cara a la reconstrucción del Péndulo para poder tener un modelo de cálculo lo más realista posible con el que trabajar y finalmente la información actual, es decir los resultados del informe realizado por los peritos del colegio de ingenieros industriales de Cataluña. Antes de comenzar, véanse las **Figura 1 y 2** en las cuales se ilustra la atracción el Péndulo antes de que se produjera el colapso para hacerse una idea de cómo era esta.

## 2.1. Sucesos

A continuación se comentará lo que sucedió a partir de la información hallada por internet según la opinión de algunos de los testigos que había en ese momento por los alrededores y los controles que realiza el parque de atracciones del Tibidabo para cada uno de las atracciones, más concretamente el control que se realizó aquel día 16 de Julio de 2010.

Las atracciones del Tibidabo se revisan cada día antes de abrir el parque, en esta revisión tienen que hacer un rodaje de prueba, sin usuarios, para ver si hay algún problema y se sigue un protocolo de seguridad, esa mañana se verificó el buen funcionamiento de la instalación comprobando el circuito hidráulico, la estructura móvil, los frenos, el correcto funcionamiento de la góndola, el buen estado de la estructura central y también revisaron los anclajes de la base del péndulo inspeccionando visualmente la tornillería que une la sección central con la columna principal, la base de la columna que une la sección principal con la base de la zapata o encofrado, sin que se detectara anomalía o deficiencia alguna.



**Figura 1.** Vista frontal del Péndulo en el instante en que se deja caer y los viajeros experimentan una caída libre. Fuente: *Youtube.com*

Tres horas y media antes del accidente se revisó la atracción por unos ruidos extraños que se producían (se detectó también un movimiento de la estructura inusual) y se verificaron los estándares habituales donde se dio por bueno el estado de la atracción realizando una prueba con la góndola vacía constatando en la revisión que el ruido escuchado era “familiar” y que entendía como habitual en instalaciones mecánicas móviles, producidos probablemente por efecto del calor. Esta declaración realizada por un miembro del personal de mantenimiento, fue consultada a fuentes del sector y aseguran que en una atracción no es habitual que chirríe y si lo hace es porque algo no funciona correctamente.



**Figura 2.** Vista de perfil del Péndulo puesto en marcha y realizando oscilaciones  
Fuente: *Youtube.com*

En el momento en el que ocurrió el accidente, los operarios de mantenimiento, constataron que la instalación se había “arrancado de cuajo” y manifestaron que “parte de los espárragos que soportaban la estructura habían sido seccionados, otros partidos y otros doblados”. (Se escribe entre comillas todo aquello que comentaron las personas implicadas textualmente, ello no asegura que la información aportada no haya sido inflada o ligeramente exagerada).

La atracción justo antes de fallar, realizó el movimiento de péndulo y en la primera oscilación, al volver a su posición inicial, toda la estructura se desplomó. El anclaje (parte inferior del péndulo), falló de la base de hormigón. Véase la **Figura 3** para observar el estado final de la atracción.



**Figura 3.** Vista del Péndulo una vez el anclaje falló y por tanto este impactó contra el suelo. Fuente: TV3

El operador de la atracción después en el juicio testificó que cuando puso en marcha la atracción, vio saltar tornillos del anclaje de uno de los lados del Péndulo, instantes después se soltaron también los del otro lado derrumbándose la instalación, no de golpe sino en diversas fases.

Las consecuencias de lo sucedido son que hubo un muerto y tres heridos en este accidente. Concretamente la víctima fue una niña de 15 años que vivía en Barcelona. Los cuatro pasajeros habían nacido en el mismo año, en 1995.

## 2.2. Controles realizados en el parque de atracciones Tibidabo

Según afirman algunas fuentes cercanas al Tibidabo, la atracción había pasado todos los controles de seguridad, controles diarios, semanales y mensuales de mantenimiento (donde una de ellas se hacía con un aparato de rayos X que debía detectar los problemas de la parte enterrada, como el estado de los tornillos) que hacen los mismos técnicos del parque por una empresa externa (que está dentro del parque) al igual que los controles certificadores externos por una segunda empresa.

Un mes antes del colapso, la atracción había superado el proceso de certificación de seguridad por parte de una empresa externa (realizado una vez al año) sin detectar que hubiera ningún problema.

Una normativa europea (UNE 13814/2006, Maquinaria y estructuras para parques y ferias de atracciones. Seguridad) fija unos mínimos de seguridad a las atracciones, a partir de aquí cada parte, establece unos protocolos. Fuentes municipales han explicado que las medidas de seguridad del Tibidabo superan las medidas de seguridad que se indican en esta normativa comunitaria.





**Figura 4.** Vista del Péndulo una vez ha colapsado por la unión del anclaje con el suelo. Fuente: TV3

Generalitat de Catalunya tiene la competencia exclusiva en materia de espectáculos y actividades recreativas como parques de atracciones donde. Cada empresa gestiona internamente el mantenimiento y subcontrata empresas externas de ingeniería especializadas en la seguridad de las atracciones.

En el plan de mantenimiento se expresan cuatro tipos de revisiones:

- **Diarias:** Se prueban todos los elementos y medidas de seguridad de todas las atracciones.
- **Semanales:** Se inspeccionan visualmente las partes mecánicas más importantes.
- **Mensuales:** Se revisan las instalaciones eléctricas y de fluidos.
- **Anual:** Se desmontan las atracciones para comprobar el estado y sustituir los elementos deteriorados o desgastados.

Cuatro meses antes del accidente, Tibidabo presentó los requerimientos técnicos del concurso para los mantenimientos del parque en que se solicitan informes periódicos. Antes del día uno de cada mes se entrega un informe sobre el estado de las instalaciones donde constan las incidencias que ha habido.

## 2.3. Empresas involucradas en el caso

Una vez se produjo el accidente, se abrieron dos investigaciones a la vez, la judicial y la del mismo Tibidabo. L'Ajuntament de Barcelona decidió encargar un informe externo al colegio de ingenieros industriales de Cataluña para que se encarguen de contactar con un perito externo que investigue las causas del accidente. Aparte del péndulo, también revisarán los protocolos de seguridad de las otras atracciones del parque.

Información sobre empresas/organismos involucradas/os en el caso:

- **Tibidabo:**
  - o *Sara Jaurrieta*: Presidenta del parque de atracciones Tibidabo, S.A.
  - o *Rosa Ortiz*: Directora del parque de atracciones Tibidabo, S.A.
- **Spie Ibérica de Mantenimiento y Montaje:** Empresa operarios mantenimiento Tibidabo. Empezó a trabajar 16 días antes del accidente (01/07/2010). Anteriormente había otra empresa de mantenimiento (Copisa).
- **Copisa:** Empresa de mantenimiento que realizó dichas tareas durante los 6 años anteriores al accidente, ésta empresa también elaboró el forjado de hormigón sobre el cual se anclaba la atracción.
- **Atisae:** Empresa certificadora. (Según Spie, indican que las revisiones estructurales competen a la empresa certificadora. Hubieran sido necesarias revisiones con ultrasonidos para poder detectar los problemas estructurales del Péndulo).
- **Delta punt enderrocs:** (93 491 21 23), encargada de desmontar el péndulo, observada en videos obtenidos de TV3. Véase **Figura 5**.



**Figura 5.** Operarios desmontando el Péndulo, en este caso desmontando la unión atornillada que une la base inferior con la base intermedia. Fuente: TV3

- **Colegio de ingenieros industriales de Cataluña:** Personas a cargo de la investigación de lo sucedido.
  - o Miembros colegio ingenieros industriales que aparecen en videos obtenidos a través de TV3:
    - *Joan Vallvé:* Decano del colegio de ingenieros industriales.
    - *Pere Alavedra:* Miembro del colegio.
- **Ajuntament de Barcelona:** Empresa participadora de la sociedad "Parc d'Atraccions Tibidabo, S.A. (PATSA).
- **Empresa municipal Barcelona de Serveis Municipals, S.A (B:SM).**
- **TV3:** Canal de televisión de Cataluña en el que se recopila gran cantidad de información.
- **Juzgado de instrucción número 2:** Lleva el caso del Péndulo.
  - o *Maria Eugenia Canal:* Jueza que lleva el caso.
  - o *Raquel Armado:* Fiscala.
- **Fabricante:**
  - o Empresa italiana Fabbri Group, proporcionan atracciones para ferias y parques de todo el mundo desde 1950, nombre original del Péndulo "Air-Diver".
  - o Fabbri Group se compromete a respetar todas las medidas de protección internacional exigidas y además se ofrece a realizar un plano específico de mayor protección si la zona tiene que estar en condiciones especiales como terremotos o fuertes vientos tal y como ponía en su página web en su momento. Actualmente, no se puede encontrar ningún dato sobre ésta atracción en ella.
  - o Hay 5 péndulos en todo el mundo (Air-Diver) con diferentes nombres en Grecia, Francia, Inglaterra (llamado Super-Booster en el parque de Brighton Pier), etc.
  - o En cuanto a la instalación, se observa que todos estos péndulos tienen una serie de tensores que fijan la columna central con el suelo a diferencia del de Barcelona (tienen esos tensores porque esas atracciones son articuladas y móviles mientras que la del Tibidabo es fija). Ingenieros dicen que el hecho de tener éstos tensores no es fundamental para la seguridad de la estructura que puede depender de otros factores como los cimientos o las fijaciones.

## 2.4. Histórico de averías sufridas por el Péndulo

Tibidabo reconoció las declaraciones de un ex encargado de la atracción, *Joaquín Barón* (a través de Copisa), denunció que el eje que sujetaba el brazo del Péndulo (no la estructura que se cayó sino el brazo que hace de péndulo) estaba

roto desde el 2007 y que se tenía que enroscar cada viernes para que aguantara todo el fin de semana dado que las tuercas que soportan el eje se aflojaban y no se sabía por qué.

Según Joaquín Barón, el eje de unión entre ambas partes de la estructura debería de haberse reparado pero no se hizo porque se avecinaba la temporada alta y se realizó un mantenimiento sobre la marcha. Afirma también, que ningún mecánico podía ver lo que había entre el hormigón y la plataforma por lo que consideró responsable a la empresa certificadora que el mes de Junio certificó la atracción.



**Figura 6.** Montaje Péndulo. Fuente: BTV

El péndulo había dado diferentes problemas como problemas hidráulicos, en el gancho de sujeción, se había averiado el eje y el sistema de freno (disco del freno). Según Tibidabo, estas incidencias no originaban ningún tipo de duda sobre la seguridad de la atracción, simplemente fueron incidencias relacionadas con el mantenimiento. El registro de las incidencias del péndulo como reparaciones e intervenciones, simplemente se detectan y se subsanan, forman parte del protocolo de mantenimiento.

Como información adicional, se conservan todos los elementos del péndulo hasta que se solucione el tema en un almacén municipal.

## 2.5. Datos útiles de cara a la reconstrucción del Péndulo

A continuación se relatan algunos aspectos, argumentaciones, parámetros, sugerencias y conclusiones obtenidas por internet que han ayudado a la hora de la realización del presente estudio. Estos se clasifican en las diferentes hipótesis

que realizan algunos ingenieros a diferentes medios de comunicación y los parámetros que caracterizan el Péndulo como son sus dimensiones, cinemática, etc. Obtenido a partir de varios medios de comunicación e incluso del catálogo que proporciona la empresa fabricante Fabbri Group.

### 2.5.1. Posibles hipótesis

Todas las hipótesis que se van a argumentar a continuación han sido realizadas o bien por gente implicada en el caso o bien por entrevistas que se han realizado a diferentes ingenieros con la finalidad de conocer su opinión.

- Error de cálculo sobre las fuerzas que podía soportar la base del péndulo. Los investigadores tratan de averiguar si los espárragos eran suficientemente largos, si estaban anclados a la base de hormigón con la suficiente profundidad y si eran del diámetro adecuado.
- (20/07/2010) Hay un aspecto que ahora mismo ya se descarta y es que el calor hubiera podido tener alguna incidencia en el comportamiento de los pernos. Su dilatación, según los datos preliminares, no habría sido un elemento concurrente en la tragedia.
- (31/07/2010) Los tornillos del anclaje de la atracción del Tibidabo estaban oxidados y se rompieron de cuajo. Los Mossos d'Esquadra habían avanzado el deterioro del mecanismo de anclaje en tierra. Fuentes cercanas a la investigación aseguraron el 30/07/2010 a "el periódico" que se ha podido comprobar que el anclaje estaba en mal estado. Los pernos que unen la atracción a la base de hormigón (cimentada con varios micropilares de 12 metros de profundidad) estaban oxidados y seccionados. Cada uno a un nivel diferente y algunos de los 54 (véase la **Figura 7** como se muestra que hay 54 espárragos) todavía tenían trozos de hormigón. Su oxidación da a entender el mal estado de conservación de las instalaciones que, según los responsables del parque, pasaba inspecciones periódicas.



**Figura 7.** Vista de la placa de anclaje del Péndulo, véase que había un total de 54 espárragos. Fuente: TV3

Otra de las incógnitas a resolver es cómo se ha producido el deterioro del anclaje. Una de las teorías que manejan los investigadores se centra en la posible incorrecta instalación en el 2006. El equipo judicial observó otro hecho singular: a causa de la lluvia del 28/07/2010 había filtraciones de agua en el terreno. Por lo tanto, se abre la posibilidad que la oxidación de los tornillos se deba a esta circunstancia.

- *Otra hipótesis hecha por otro ingeniero:* O bien los pernos que sujetaban el fuste de la atracción de 38 metros estaban defectuosos, o bien el diseño del sistema de anclaje era insuficiente para aguantar la atracción. En el segundo caso, tres fórmulas hubiesen bastado para compensar el error: utilizar más pernos, usarlos de mayor diámetro o separarlos más de la base.
- *Avance análisis pericial (21/11/2010):* Algunas de las hipótesis que se argumentan son:
  - o Los cálculos para asegurar la fijación no eran correctos.
  - o En el caso que estos cálculos fuesen correctos, no fueron seguidos para levantar el Péndulo.
  - o Las sujeciones para que no se produjera un derrumbe no estaban bien aseguradas.
  - o No se estudió correctamente el terreno donde se ubicó la atracción y que acumulaba mucha agua, lo que restaba dureza a la superficie.
- *(10/03/11):* No hay una única causa que explique el accidente mortal. Hubo errores, para empezar, en las mediciones de los ingenieros, que debían garantizar la estabilidad de la instalación. El montaje de la atracción también acarreó problemas y el diseño de los anclajes, que acabaron cediendo, no eran los adecuados. La fatiga mecánica progresiva del acero con el que éste estaba construido hizo que se desplomara.
- *Valoración realizada por un ingeniero de estructuras (por TV3):* El hormigón es poroso, absorbe agua, si hay escorrentías por debajo puede hacer que la base de hormigón que es la que debe aguantar todos los empujes, las escorrentías hayan movido un poco el terreno y el dado se haya podido inclinar un poco, entonces, los esfuerzos que aunque sean 3 o 4 grados de diferencia que se hayan producido pueden ser muy diferentes. Otro aspecto que podría haber pasado es que las aguas de escorrentías que estuvieran por ahí, llevaran un componente de cloratos, sulfatos o otra sustancia que ataque a los pernos de acero que se clavan dentro de la base y los hayan desgastado con el tiempo.

### 2.5.2. Dimensiones, elementos de la estructura y cinemática

En un primer momento, antes de comenzar a realizar una reconstrucción meticulosa, a continuación se describirán algunas de las consideraciones que se han tomado de partida, debido a la enorme falta de datos, se formalizarán



algunas de estas consideraciones como referencia para obtener los resultados finales.

- Plano Air Diver: Se ha hallado por internet dado que en la página web del fabricante ya no hay información alguna sobre esta atracción. Se observa que faltan datos en el plano, la solución que se tomará será la de realizar mediciones intermedias con el programa informático AutoCAD a escala en el mismo.
- La atracción del Péndulo consta en un brazo articulado de 25 metros de longitud, una góndola con una capacidad para 4 personas, sube 38 metros y cae a 100 km/h en 2,8 segundos con un recorrido de 50 metros. Se consigue una aceleración de aproximadamente 4g.
- El anclaje del péndulo consta de 54 espárragos, estos según fuentes obtenidas por algunos medios de comunicación, tienen que ser estudiados todos para ver que esfuerzos han sufrido cada uno, como por ejemplo: tracción, cortante, flexión, fatiga, etc. Se pretende realizar un análisis de cada uno de ellos.

## 2.6. Información actual

El informe realizado por los peritos del Colegio de Ingenieros Industriales de Cataluña hacen constancia de que consideran que en la caída del Péndulo se hacen presente varias causas, aunque según este informe fueron determinantes las deficiencias en el diseño de la base de la atracción por parte de Fabbri Group, la empresa fabricante italiana.

Según el informe, la atracción falló debido a la fatiga que se produjo en su base debido a un error en el diseño y el cálculo de los pernos que soportaban la base por parte Fabbri Group.



**Figura 8.** Vista de una tuerca perteneciente a la unión de la placa de anclaje.  
Fuente: TV3

Se distingue entre varias causas, que existen deficiencias en

- La fabricación
- La instalación
- Las revisiones de la atracción de las vibraciones que el Péndulo producía en los pernos. Señala a la empresa certificadora Atisae que no detectara la rotura de los pernos en la última prueba realizada por ultrasonidos el 9 de Junio de 2010, es decir prácticamente un mes antes del colapso de la atracción ya que la falla se produjo el 16 de Julio de 2010. Además, la pericial señaló que los medios que utilizaron para la revisión del Péndulo un mes antes del fallo del mismo, no eran los adecuados para validar el buen estado del Péndulo sino que se necesitaban pruebas realizadas con rayos X.
- El diseño, dado que la empresa italiana Fabbri Group no tuvo en consideración los efectos de la vibración de la propia estructura debido a su rigidez, se indica que esta es la causa determinante del colapso de la atracción según los autores del estudio, indicando que no fue un error de cálculo sino de diseño dado que debido a esta flexibilidad de la estructura, se transmite a los pernos unos esfuerzos que reducen dramáticamente por fatiga las previsiones de la vida útil esperada, por tanto, el tamaño de los pernos debería de haber sido distinto.

Se destaca que se podía haber evitado el accidente con una revisión externa del proyecto realizado por Fabbri Group y una minuciosa inspección de los pernos que fallaron durante la revisión de junio del 2010.



**Figura 9.** Vista del brazo articulado partido después de que el anclaje fallara y el Péndulo se viniera abajo. Fuente: TV3

Entre las causas que argumentan el accidente, el estudio realizado señala cuatro imputables:



- La empresa fabricante: Por la falta de definición de la calidad resistente del acero y la geometría de los pernos, los fallos que se produjeron en el proceso constructivo definido por Fabbri Group y la solución constructiva que ésta definió para la base de la atracción.
- Responsables del proyecto de urbanización y a la dirección de la obra de haber aceptado unos pernos de un acero con unas características mecánicas inferiores a las seleccionadas por Fabbri Group debido a la falta de definición por parte de la empresa italiana.
- Empresa constructora dado que en el informe se considera deficiente el mortero de nivelación que se colocó en la base de la atracción, es decir, la incorrecta aplicación del mortero de relleno introducido entre la pletina (pieza metálica de forma rectangular y de espesor reducido) acoplada en la base del fuste y la zapata de cimentación, este mortero de relleno o autonivelante es como un mortero normal pero lleva una serie de aditivos que le proporcionan una mayor fluidez lo que comporta en obtener un acabado más liso y nivelado debido a que se extiende con facilidad.

Uno de los ingenieros que realizó los cálculos de la estructura, argumentó que sus cálculos estaban pensados para una atracción instalada sobre una base móvil y no fija como la del Péndulo ubicado en el Tibidabo. Por tanto se plantea un error en el rediseño de la atracción.

Fabbri Group, modificó éstos parámetros para adaptarlos a una base fija, modificando de esta forma el proyecto. El ingeniero, no atribuyó como suyos una serie de cálculos que se habían agregado para modificarlo a base fija.

La fiscalía estudia el informe realizado por la empresa certificadora Applus para imputar a los responsables de cada una de las deficiencias citadas los cuales pueden ser operarios y responsables de las empresas que han participado en este caso.



**Figura 10.** Vista del Péndulo colapsado de perfil. Fuente: TV3

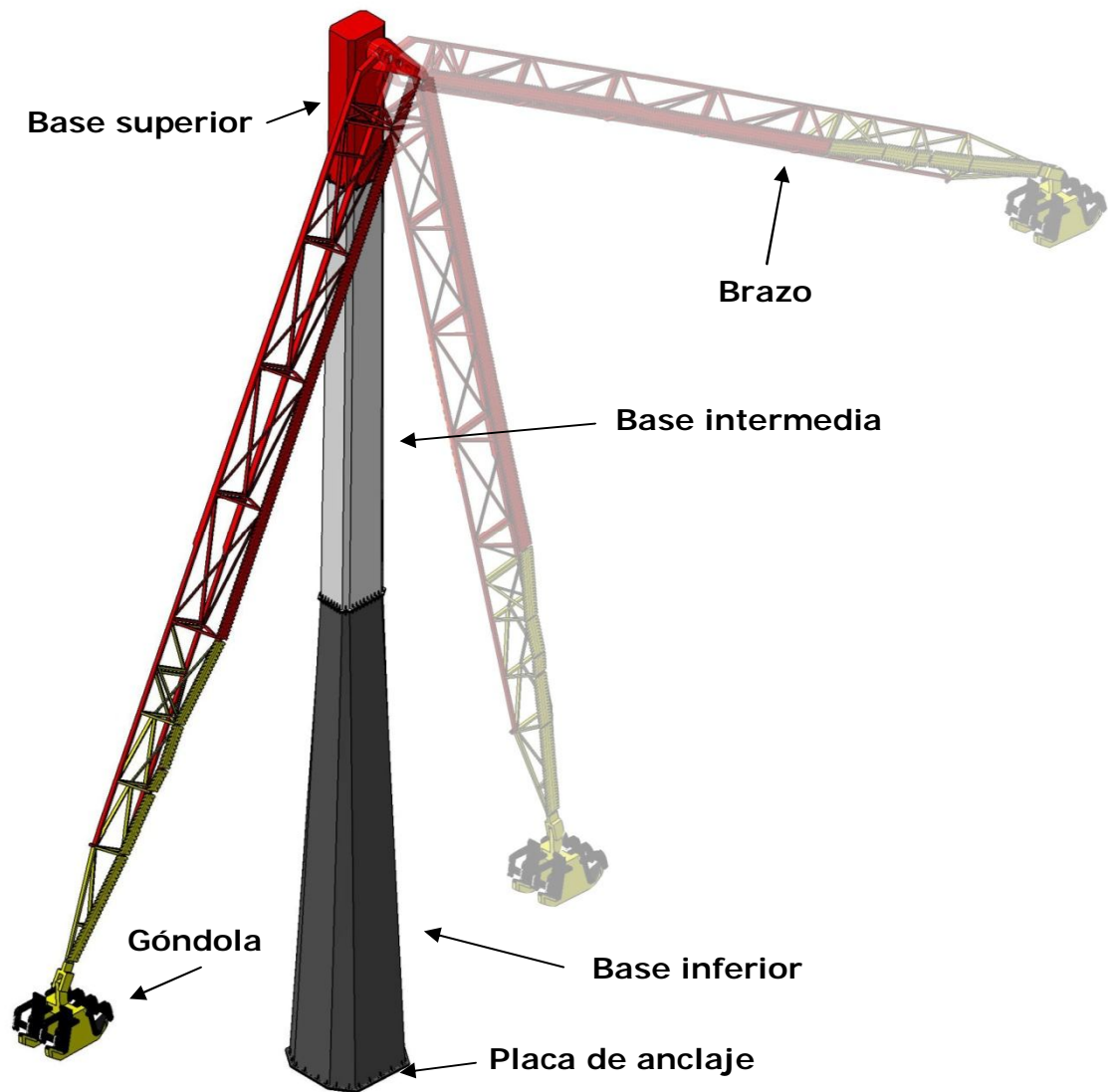


# CAPÍTULO 3:

## DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y SUS ELEMENTOS

A continuación se describirán todos y cada uno de los componentes que han sido reconstruidos a partir del primer anexo, el correspondiente a la reconstrucción de la geometría del Péndulo. Se comentará la función que tiene cada uno y se ilustrarán diferentes imágenes con la finalidad de que el lector pueda seguir correctamente el presente proyecto. Se recuerda que la totalidad de los datos obtenidos para poder reconstruir esta geometría han sido obtenidos de fotografías obtenidas por diferentes medios de comunicación e internet por lo cual sus dimensiones son aproximadas. No obstante, tal y como se verá a continuación, se ha dotado a la atracción de todo lujo de detalles, evitando de esta forma en la medida de lo posible tener que hacer uso de simplificaciones, estos detalles serán muy importantes sobre todo a la hora de obtener los datos del Péndulo como masas, inercias, centros de gravedad, etc. Es decir, de la precisión que se realice en la reconstrucción de toda la geometría dependerán los resultados finales obtenidos.

Finalmente, se obtiene como resultado de la reconstrucción de la geometría del Péndulo la **Figura 11** en la que se indican las diferentes partes integrantes del Péndulo.



**Figura 11.** Imagen general del Péndulo en diferentes posiciones

La estructura reconstruida consiste en las seis partes indicadas en la **Figura 11**, es decir, placa de anclaje, base inferior, base intermedia, base superior, brazo y góndola. A continuación, se indican imágenes con más detalle de estas partes integrantes a partir de las cuales se obtienen resultados.

El modelo reconstruido será comparado con el existente en el parque de atracciones Tibidabo con la finalidad de observar la precisión que se ha conseguido a partir de solamente imágenes.

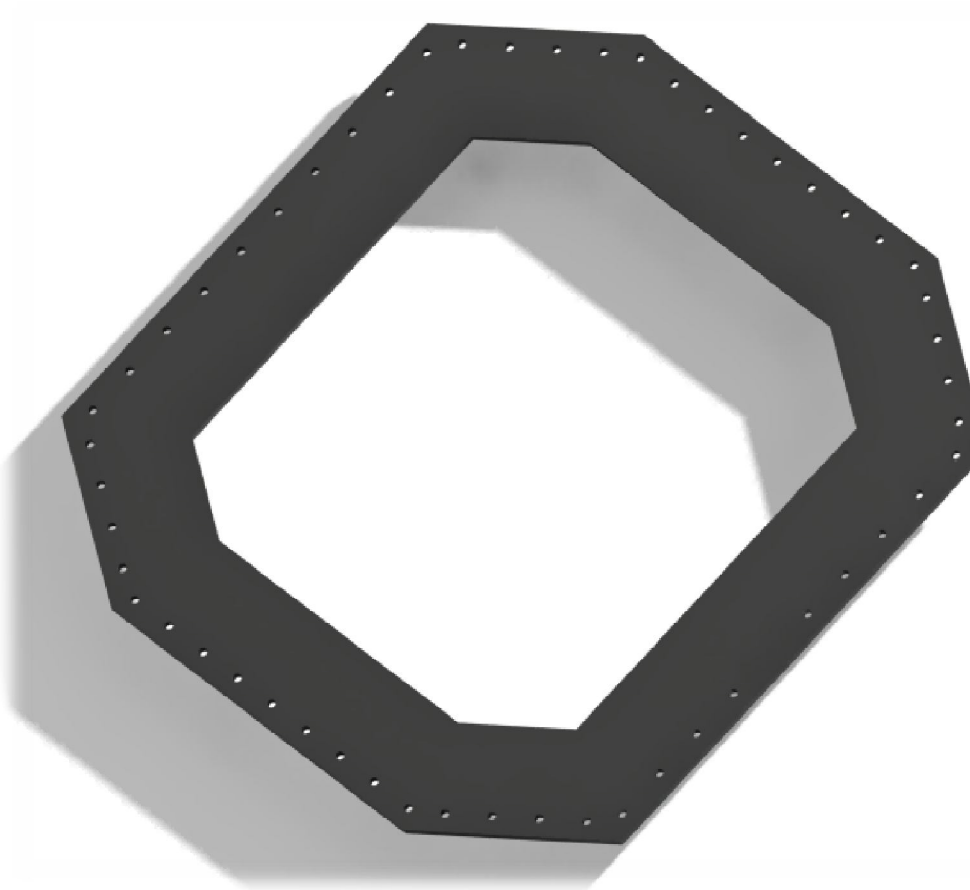
### 3.1. Placa de anclaje

En la **Figura 12**, se observa la placa de anclaje existente en el Péndulo, véase que ha sufrido el ataque de la corrosión, esta era la que estaba en contacto con la base inferior y por tanto, gracias a la precarga que se le aportaba a los espárragos, por fricción era capaz de absorber los esfuerzos cortantes facilitando que los espárragos únicamente trabajaran axialmente, tal y como deben de hacerlo.



**Figura 12.** Visualización de la placa de anclaje (color marrón debido al estar atacada por la corrosión) y la base inferior Véanse algunos rigidizadores que presenta la base inferior. Fuente: TV3

En la **Figura 13**, se indica la reconstrucción de la placa de anclaje, téngase en cuenta la gran importancia de las dimensiones, es decir, sobretodo la distribución de los agujeros dado que ha sido un parámetro clave para determinar correctamente la distribución de los esfuerzos sobre los espárragos mediante el método de cálculo por pilotajes deducido en el segundo anexo en el cual se obtienen los esfuerzos que absorben cada uno de los espárragos durante los 140 segundos en los que el Péndulo realiza una puesta en marcha, es decir, desde que se deja caer desde una altura determinada hasta que se detiene. Lógicamente estos esfuerzos que se producen van variando con el tiempo debido a las fuerzas de inercia que se producen en el movimiento.



**Figura 13.** Vista de la reconstrucción de la placa de anclaje

### 3.2. Base inferior

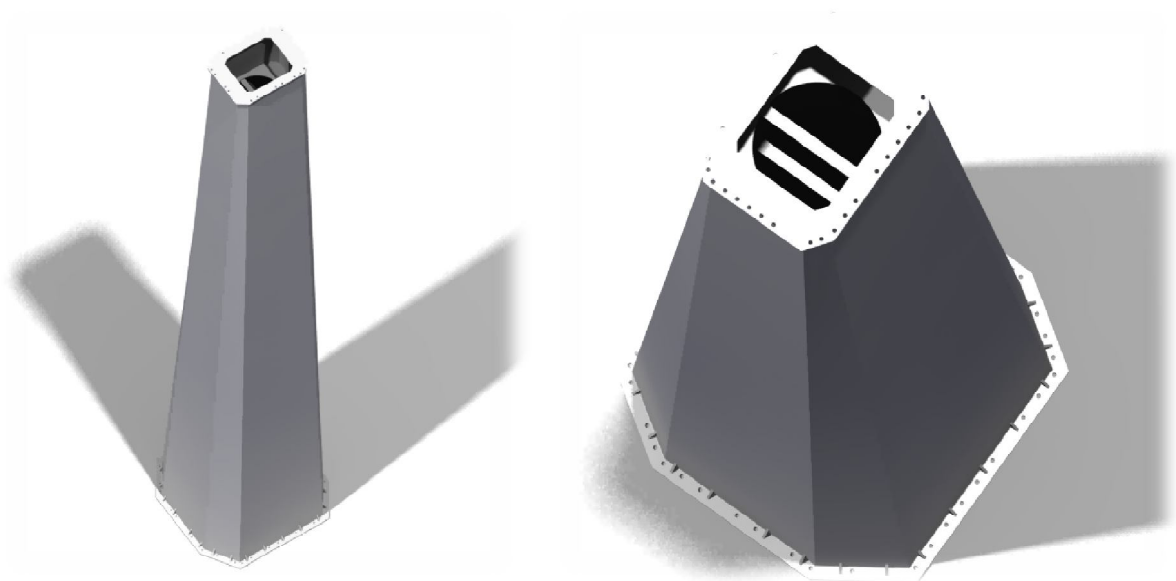
Esta parte del Péndulo era la se apoyaba sobre el suelo, es decir, estaba en contacto con la placa de anclaje y el otro extremo estaba en contacto con la base intermedia. Véase en la **Figura 11** como la base estaba formada por tres elementos, en el presente proyecto estas partes serán denominadas como base inferior, base intermedia y base superior respectivamente.

Esta base inferior puede observarse en la **Figura 14**.



**Figura 14.** Detalle de la base inferior (la que está en contacto con el suelo).  
Fuente: TV3

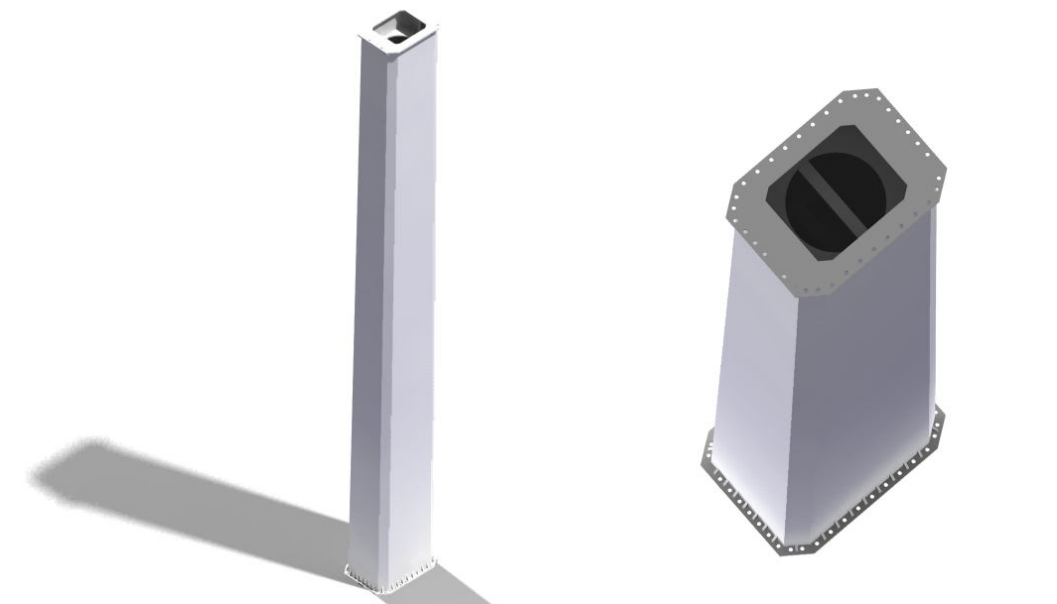
En la **Figura 15**, se muestra la reconstrucción de dicha base inferior. Véanse los rigidizadores interiores, estos también se observaban en la **Figura 12** correspondiente al Péndulo existente en el Tibidabo.



**Figura 15.** Reconstrucción de la base inferior.

### 3.3. Base intermedia

Por debajo de la base intermedia se encuentra la base inferior comentada anteriormente y por encima estará la base superior tal y como se observará más adelante. La distribución de los espárragos sobre esta base (tanto por el lado en contacto con la base inferior como por el lado en contacto con la base superior) también ha sido importante de cara a la verificación de los esfuerzos sobre estas dos uniones adicionales además de la que falló. Con esta distribución, tal y como se ha comentado anteriormente, se ha determinado los esfuerzos axiales que soportaban los espárragos por el método de la distribución de la carga en grupos de pilotes. Obsérvese en la **Figura 3** el aspecto que tenía la base intermedia. Ahora compárelo con el reconstruido en la **Figura 16**. Véase que esta base también tiene la presencia de rigidizadores en su interior que favorecen el lado en que tienen menor inercia.



**Figura 16.** Reconstrucción de la base intermedia

### 3.4. Base superior

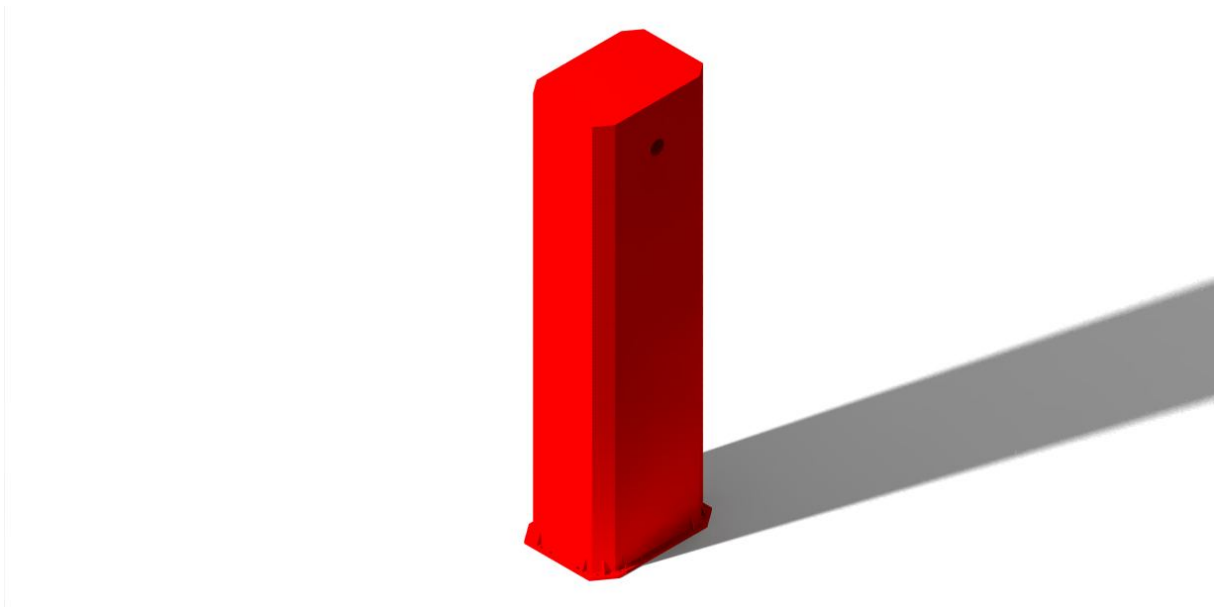
Finalmente, a continuación se presenta la última parte del elemento que forma el fuste del Péndulo, es decir, la base superior. En esta, se aloja el brazo del Péndulo que a su vez este último elemento tal y como se verá más adelante lleva consigo la góndola. Véase en la **Figura 17** el aspecto que tenía esta base superior.





**Figura 17.** Vista de la base superior una vez el Péndulo colapsó. Fuente: TV3

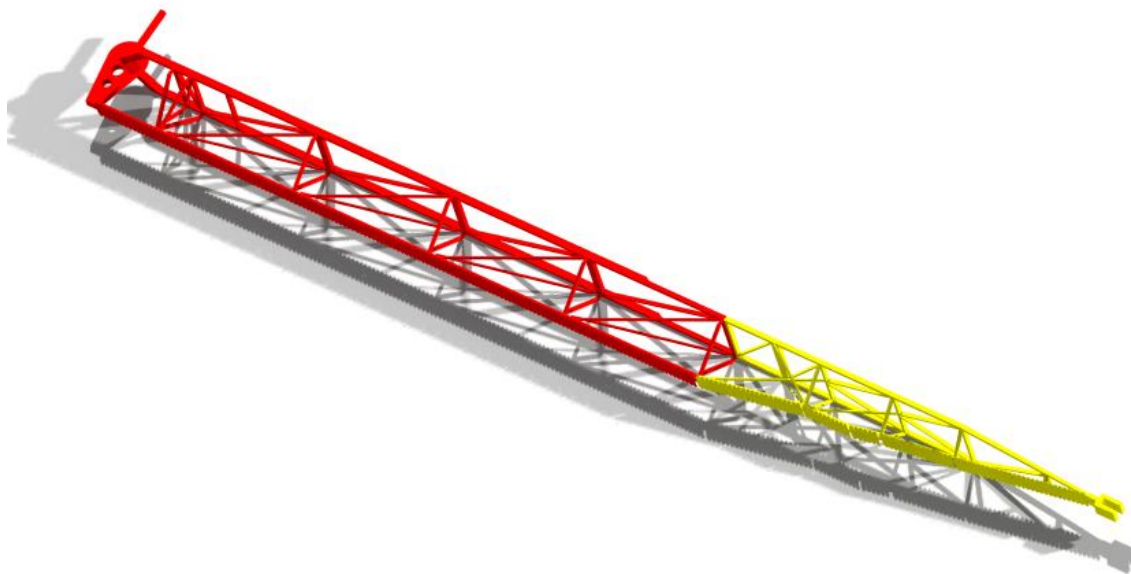
A continuación, en la **Figura 18**, se presenta en aspecto de la base superior reconstruida. En la parte inferior de esta base se une la base intermedia vista anteriormente. Esta base, aunque no se vea en la imagen mostrada, también tiene la presencia de rigidizadores en su interior, también distribuidos de tal forma que favorezcan el eje con menor inercia.



**Figura 18.** Reconstrucción de la base superior

### 3.5. Brazo

Una vez se han definido todos los elementos que componen el fuste del Péndulo, a continuación se presenta el brazo, elemento que va sujeto a la base superior y sustenta la góndola. Tal y como puede observarse en la **Figura 9**, este presenta una geometría bastante complicada de definir sin la presencia de sus medidas. No obstante, a través de una inversión considerable de tiempo, se ha logrado reproducir dicha geometría con todo lujo de detalles tal y como se observa en la **Figura 19**.



**Figura 19.** Vista del brazo del Péndulo reconstruido

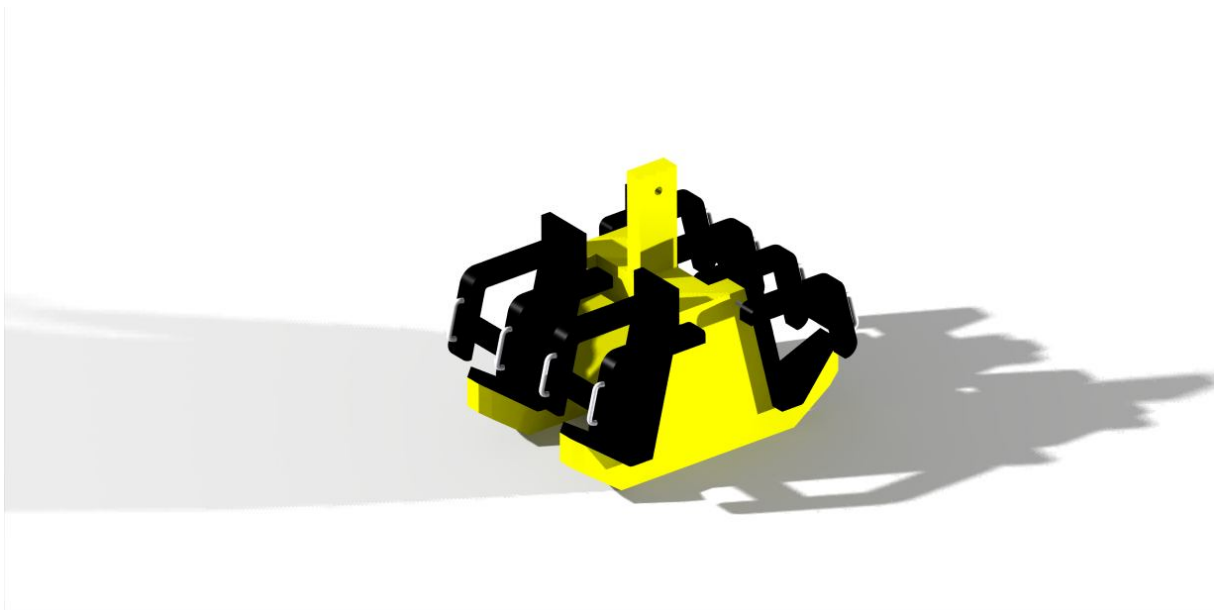
### 3.6. Góndola

Finalmente, a continuación se presenta el último de los elementos que se han reconstruido con la finalidad de obtener un modelo de cálculo a partir del cual obtener resultados. En la **Figura 20**, se indica el aspecto que tenía la góndola antes que se produjera el fallo en el anclaje de la atracción.



**Figura 20.** Visualización de la góndola en funcionamiento con pasajeros en ella.  
Fuente: *Youtube.com*

A continuación, en la **Figura 21**, se muestra el aspecto de la góndola reconstruida.



**Figura 21.** Reconstrucción de la góndola

### 3.7. Aspecto final

Finalmente se comparan ambos modelos, el que existía en el parque de atracciones Tibidabo y el reconstruido en la **Figura 22** observándose un grado alto grado de semejanza.



**Figura 22.** Comparativa entre el modelo (derecha) y la realidad (izquierda)  
(Imagen izquierda fuente: Youtube.com)



# **CAPÍTULO 4:**

# **ANÁLISIS POR**

# **ELEMENTOS FINITOS**

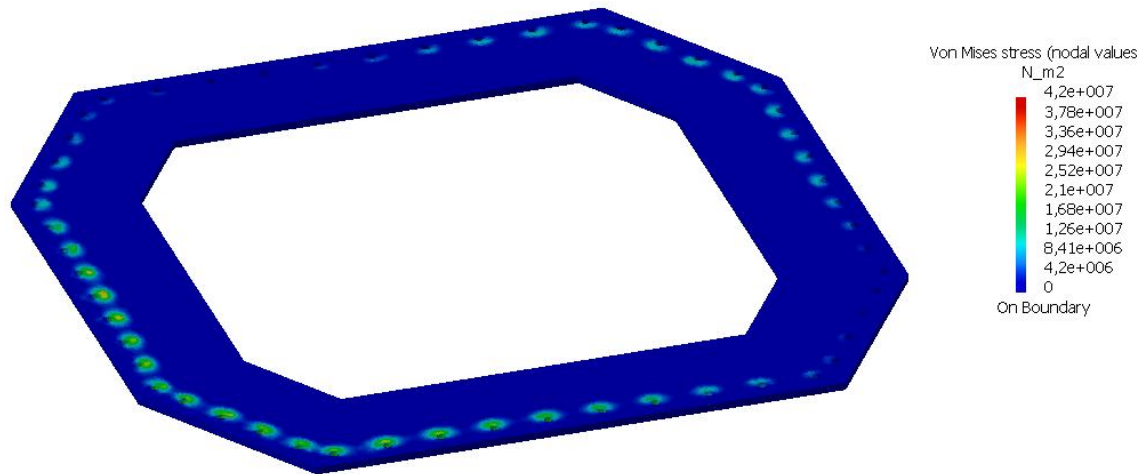
# **DE LA ESTRUCTURA**

En el presente capítulo se va a abordar un análisis por elementos finitos de la estructura que compone todo el Péndulo, a pesar de que la atracción no falló por ninguno de los elementos estructurales citados anteriormente, conviene realizar un análisis con la finalidad de comprobar el buen diseño de la estructura. En este, se ilustrará el análisis de todos los elementos mostrados en el capítulo anterior correspondiente a la descripción de la estructura y sus elementos. Resulta importante remarcar que los datos que a continuación se presentan son mostrados bajo las condiciones en que el Péndulo está más solicitado. No obstante, se recuerda al lector que los elementos estructurales que se analizarán han sido obtenidos fruto de la reconstrucción realizada del Péndulo en el primer anexo, por tanto los resultados que a continuación se muestran son un esbozo de lo que sucedía en el Péndulo ubicado en el Tibidabo, sobre todo, este comentario realizado va referenciado a las uniones.

Se recuerda que se ha considerado como material, el acero S 275 JR debido a que es uno de los aceros estructurales más utilizados.

## 4.1. Placa de anclaje

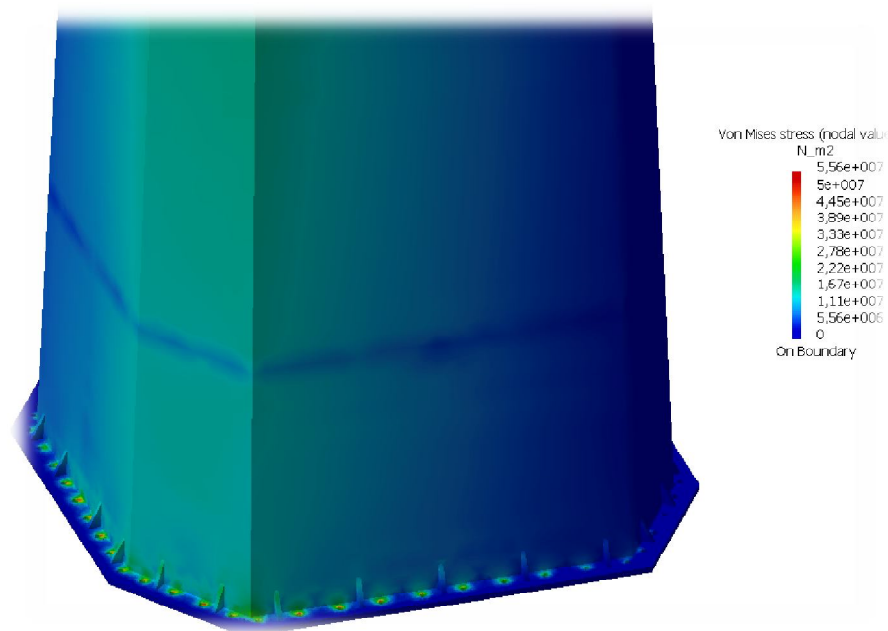
A continuación se muestra la placa de anclaje sobre la que estaba apoyado el Péndulo, véase la influencia de los espárragos sobre la misma.



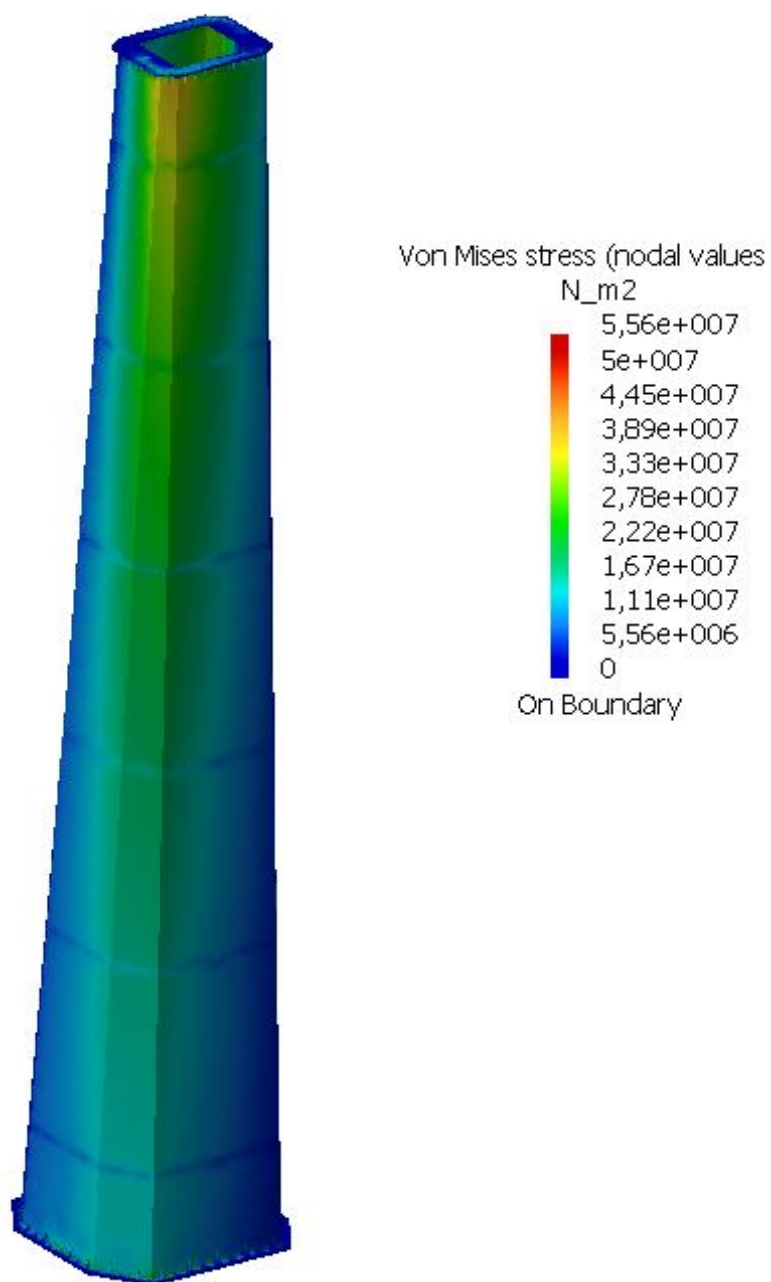
**Figura 23.** Análisis por elementos finitos de la placa de anclaje mostrando la tensión equivalente de von Mises

## 4.2. Base inferior

En la **Figura 25** se muestra el análisis por elementos finitos realizado sobre la base inferior, en esta se observan seis discontinuidades que hay en su sentido longitudinal, estas son debidas a los rigidizadores interiores que tiene la misma. Véase en detalle en la **Figura 24**, la distribución de tensiones sobre la unión con el suelo.



**Figura 24.** Análisis por elementos finitos mostrando la tensión equivalente de von Mises en la base inferior detallando la unión con el suelo

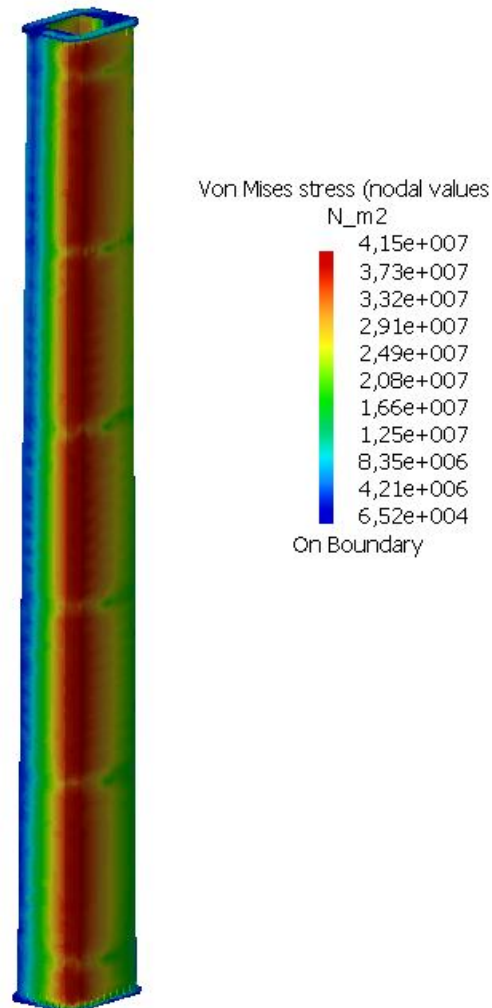


**Figura 25.** Análisis por elementos finitos de la base inferior mostrando la tensión equivalente de von Mises



### 4.3. Base intermedia

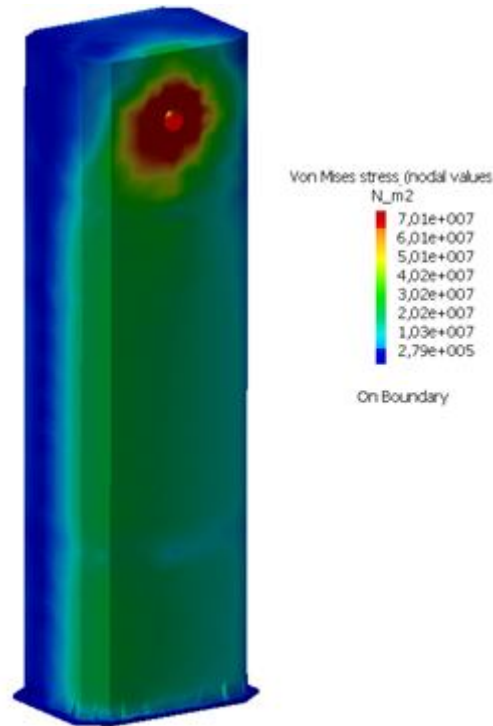
En la **Figura 26**, se ilustra la distribución de las tensiones equivalentes de von Mises sobre la base intermedia, al igual que se indicaba en la base inferior, obsérvese las discontinuidades producidas en su eje longitudinal provocado por los rigidizadores que tiene este elemento estructural en su interior.



**Figura 26.** Análisis por elementos finitos de la base intermedia mostrando la tensión equivalente de von Mises

## 4.4. Base superior

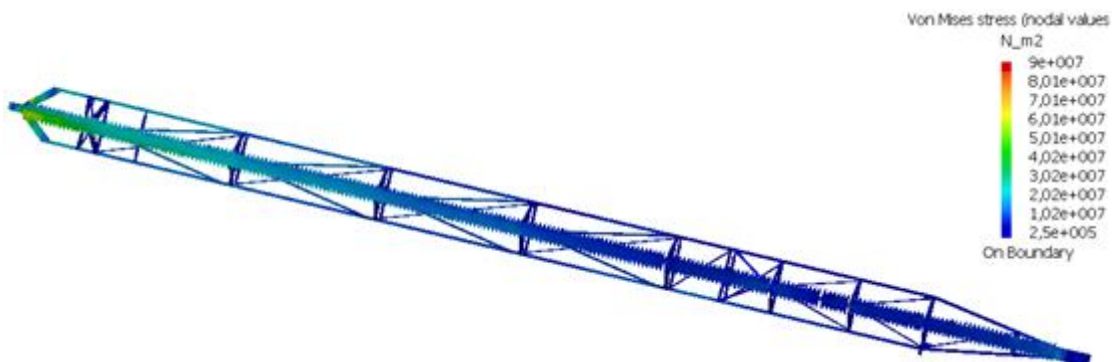
A continuación, en la **Figura 27**, se muestra la distribución de las tensiones equivalentes de von Mises sobre la base superior.



**Figura 27.** Análisis por elementos finitos de la base superior mostrando la tensión equivalente de von Mises

## 4.5. Brazo

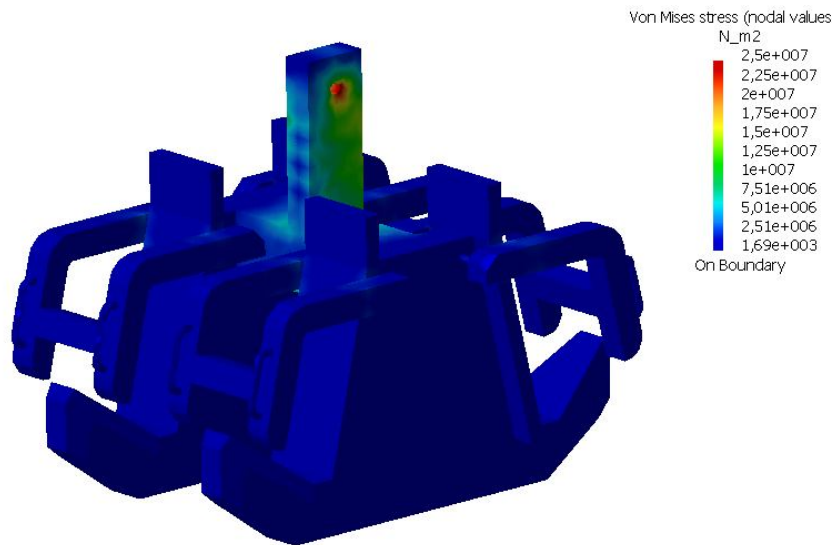
En la **Figura 28**, se ilustra la distribución de tensiones sobre el brazo del Péndulo.



**Figura 28.** Análisis por elementos finitos del brazo mostrando la tensión equivalente de von Mises

## 4.6. Góndola

Finalmente, a continuación, en la **Figura 29**, se muestra la distribución de tensiones sobre la góndola.



**Figura 29.** Análisis por elementos finitos de la góndola mostrando la tensión equivalente de von Mises



# CAPÍTULO 5:

## PRESUPUESTO GENERAL

A continuación, en la **Tabla 1**, se presentan los presupuestos que se consideran para la realización del estudio realizado. Debido a la totalidad de la falta de datos con la cual se ha partido, debe tenerse en cuenta los costes referentes a la recopilación de la información necesaria, obtención de las cotas, análisis estadístico de las mismas, reajustes, etc.

Descripción	Horas	Precio/hora	Precio total
Recopilación de información	30	30 €/h	900,00 €
Obtención de cotas	200	30 €/h	6.000,00 €
Análisis estadísticos de las cotas	20	45 €/h	900,00 €
Reajustes de las dimensiones	10	45 €/h	450,00 €
Elaboración modelo en 3D	150	30 €/h	4.500,00 €
Análisis cinemático	190	45 €/h	8.550,00 €
Análisis dinámico	60	45 €/h	2.700,00 €
Análisis resistente de los espárragos	300	45 €/h	13.500,00 €
Análisis por elementos finitos de la estructura	25	45 €/h	1.125,00 €
Elaboración de las conclusiones	30	45 €/h	1.350,00 €

Programación del código de cálculo resistente	90	45 €/h	4.050,00 €
Programación del mecanismo de rotura de los espárragos	30	45 €/h	1.350,00 €
IVA (18%)			8.167,50 €
<b>TOTAL:</b>	1135		53.542,50 €

**Tabla 1.** Presupuesto general

El coste total del informe asciende a CINCUENTA Y TRES MIL QUINIENTOS CUARENTA Y DOS CON CINCUENTA CÉNTIMOS DE EURO (53.542,50 €).



# **CAPÍTULO 6:**

# **CONCLUSIONES**

Antes de empezar con las conclusiones, resulta importante realizar un breve repaso de lo que se ha realizado en el presente estudio con la finalidad de que el lector pueda ver en que se basa el mismo, cómo y de donde se obtienen las conclusiones a las que se llegan después del análisis realizado.

El primer paso que se dio a la elaboración del presente proyecto fue primero documentarse de forma correcta, tal y como se le ofrece la oportunidad al lector en el segundo capítulo, ello ha sido vital para llevar a cabo dicho estudio dado que la única información que se ha logrado obtener, debido a la confidencialidad del asunto ha sido mediante diferentes medios de comunicación tales como periódicos, informativos, internet, etc. Se recuerda que absolutamente la totalidad de los datos, ha sido elaborada y trabajada por el autor, es decir, en ningún caso se ha obtenido de forma directa las dimensiones, masas, inercias, centros de gravedad, etc. Del Péndulo, todas las propiedades con las que se ha trabajado han sido fruto del modelo obtenido en el primer anexo de la reconstrucción de la geometría del Péndulo.

Una vez primero se ha realizado la investigación acerca de la información necesaria, se ha elaborado el primer anexo, el de la reconstrucción de la geometría del Péndulo, en el que se argumentan todas y cada una de las dimensiones que se han adoptado con la finalidad de obtener el modelo de cálculo más fiable posible. Se ha trabajado desde un primer momento con el plano del modelo Air Diver (perteneciente al Péndulo) realizado por la empresa fabricante italiana Fabbri Group hallado en un foro de ingeniería, a partir de esas cotas de referencia con el programa informático AutoCAD se han determinado las demás cotas medidas sobre imágenes. No se pudo hallar el plano del modelo Air Diver en la página del fabricante dado que ya no comercializa con el mismo y pese a que la imagen del plano obtenida no era de muy buena calidad se han podido sacar buenos resultados tal y como se observa en el capítulo 3 "Descripción de la estructura y sus elementos".

Una vez finalizado el anexo referente a la construcción del modelo de cálculo, se obtiene un peso total del sistema de 39 toneladas y en el catálogo de un Air



Diver facilitado por Fabbri Group, indica un peso total de 40 toneladas, por tanto, en cuanto a peso se obtiene un grado de aproximación muy elevado.

Con un modelo en 3D con el que trabajar, posteriormente al anexo 1, se ha realizado el segundo anexo, correspondiente a la determinación de los esfuerzos sobre cada uno de los espárragos que componen la unión de la base inferior en contacto con el suelo (también se ha realizado el cálculo de los esfuerzos para los pernos de las uniones de la base inferior en contacto con la intermedia y la base intermedia en contacto con la superior, no obstante, tal y como se ha comentado al inicio, el presente estudio tiene como objetivo determinar las causas del colapso del Péndulo, por tanto toda la atención se centrará en el anclaje que es por donde falló). En el citado anexo, se realizan diferentes modelos de cálculo como:

Sistema con un grado de libertad utilizando un modelo para pequeñas oscilaciones

Sistema con un grado de libertad utilizando un modelo para grandes oscilaciones

Sistema con dos grados de libertad utilizando un modelo para grandes oscilaciones

Para cada uno de estos modelos de cálculo, se ha realizado el análisis teniendo en cuenta que las partes móviles presentan rozamiento con el aire y teniendo en cuenta que estas no lo presentan con la finalidad de realizar la comparativa y ver la influencia que tiene este rozamiento sobre las partes móviles y como se comporta el conjunto.

Además también para cada uno de estos casos se ha considerado que la base estaba inclinada un determinado ángulo con respecto al suelo, es decir que el Péndulo estaba inclinado como si de la Torre de Pisa se tratara tal y como se citaba en alguna de las hipótesis indicadas en el segundo capítulo por un ingeniero de estructuras, debido a que el dado de hormigón que se encuentra en la zapata del Péndulo, al ser poroso y estar expuesto a la presencia de escorrentías, podría haberse inclinado y este hecho podría haber mayorado los esfuerzos que reciben los espárragos del anclaje produciendo el colapso, efectivamente una vez realizado esta comprobación se observa cómo existen valores pico más elevados que cuando el fuste se encuentra totalmente perpendicular al suelo.

En los modelos con dos grados de libertad, se ha realizado un artefacto matemático de tal forma que cuando el sistema brazo-góndola pasen por el punto más bajo en la primera oscilación, se produzca un acoplamiento entre ellas formando a partir de este nuevo punto un sistema con un grado de libertad. De esta forma se consigue obtener todo en una misma expresión teniendo en cuenta unas condiciones iniciales referentes a un sistema con dos grados de libertad, las cuales son diferentes a las que se producían en un sistema de un grado de libertad

Al final del segundo anexo se presentan las conclusiones de todas las tensiones que absorben los espárragos del anclaje (además de las otras dos uniones) listas para ser trabajadas en el tercer y último anexo perteneciente al análisis a fatiga. Además, como tabla resumen, se obtienen los siguientes resultados en comparación con los que ofrece Fabbri Group en su modelo Air Diver mostrados en la **Tabla 2**. En esta se muestra el tiempo que transcurre hasta que el

pasajero experimenta su velocidad máxima de aproximadamente 100 km/h y una aceleración de alrededor de 4g.

Modelo de cálculo	Grados de libertad		Rozamiento con el aire		Hipótesis		Tiempo (s)	Tiempo <sub>calculado</sub> / Tiempo <sub>Fabri Group</sub>
	1 GDL	2 GDL	Con rozamiento	Sin rozamiento	Base perpendicular al suelo	Base inclinada		
Pequeñas oscilaciones							2,20	0,79
							2,20	0,79
							2,30	0,82
							2,40	0,86
Grandes oscilaciones							3,00	1,07
							3,00	1,07
							3,10	1,11
							3,10	1,11
							3,10	1,11
							3,10	1,11
Datos de Fabbri Group							2,80	

**Tabla 2.** Tiempo transcurrido hasta que el viajero experimenta una velocidad máxima de 100 km/h y aceleración de 4 g aproximadamente

Una vez se han obtenido las solicitaciones sobre cada uno de los espárragos en el segundo anexo, se introduce el tercero, el de análisis a fatiga con una introducción de lo que se trata la fatiga con la finalidad de que el lector entienda lo que en el texto se explica y pueda seguir los pasos indicados con facilidad. Una vez se ha anivelado a un cierto nivel de conocimientos acerca de fatiga al lector, se deducen los diferentes criterios a fatiga que se utilizarán como: Söderberg, Goodman modificado y Gerber con los cuales al final, se trabaja con el de Gerber por ser el menos conservador de todos. Véase que se ha tenido que realizar un programa de cálculo a fatiga dado que de no ser así, hubiese sido completamente inviable realizar el cálculo a fatiga de 54 espárragos pertenecientes a una sola hipótesis. Finalmente, al final del anexo correspondiente al análisis a fatiga, es donde se determinan las consecuencias del colapso de la atracción, para ello, es necesario elaborar un código de programación con el cual permite determinar la duración del último espárrago resistente del anclaje. La duración de este último espárrago será la que determinará la duración del anclaje. Resulta importante remarcar que sin el uso de este programa realizado el cual determina el mecanismo de rotura de los espárragos indicando el orden en el que fallan y la duración que cada uno de ellos obtiene, hubiese sido imposible determinar la duración del anclaje ya que habría que realizar como mínimo  $54 \times 54 = 2916$  iteraciones, es decir, el cálculo de la duración de vida para cada uno de los 54 espárragos para cada vez que falla cada uno de estos 54 en la que se produce una redistribución de los esfuerzos. Por ello, después de solucionar todos estos problemas que se han presentado por el camino, a continuación se adjunta la **Tabla 3**, en la que se resume las posibles hipótesis de lo sucedido para un modelo con dos grados de libertad el cual se considera el más apropiado debido a la mayor representación de lo que sucedía en el parque de atracciones Tibidabo.

Métrica	M30				
Calidad acero	ISO 8.8				
Rosca	Laminada				
Normativa	DIN 976				
Caso 1. Supervivencia del anclaje. Hipotético caso: sin la presencia de un excesivo par de apriete ni presencia de corrosión					
	$\sigma_{\text{precarga}}$ (MPa)	$\sigma_f$ (MPa)	$\sigma_{\text{precarga}}/\sigma_u \cdot 100$	Par de apriete (N·m)	Duración (años)
1.1. Supervivencia con una precarga del 90% del límite de proporcionalidad, es decir la recomendada	540	129	65	1818	Infinita
1.2. Supervivencia con una precarga del 90% del límite elástico	594	129	72	1999	Infinita
1.3. Supervivencia con una precarga del 110% del límite elástico	726	129	87	2444	Infinita
Caso 2. Falla del anclaje. Caso más realista.					
	$\sigma_{\text{precarga}}$ (MPa)	$\sigma_f$ (MPa)	$\sigma_{\text{precarga}}/\sigma_u \cdot 100$	Par de apriete (N·m)	Duración (años)
2.1. Falla producida únicamente por un exceso en la precarga de un 129 % del límite de proporcionalidad o lo que es lo mismo 117% del límite elástico	780	129	94	2598	4
2.2. Falla producida por la presencia de corrosión con $k_g=0,077$ y una precarga del 90% del límite de proporcionalidad	540	10	65	1818	4
2.3. Falla producida por la combinación de una precarga del 110% del límite elástico y la presencia de corrosión con $k_g=0,36$	726	46	87	2444	4

**Tabla 3.** Tabla resumen en la que se indican las hipótesis que pudo dar lugar al colapso de la atracción para la consideración de la base totalmente perpendicular al suelo.

Lo que se resume en la **Tabla 3**, son básicamente las siguientes conclusiones:

Se utilizan espárragos de métrica M30 dado que ha sido el tamaño que se ha obtenido en el anexo de la reconstrucción del Péndulo, una calidad ISO 8.8 ya que se considera la calidad mínima que debería de haberse hecho uso para una unión pretensada, otras calidades no son las recomendadas para estos tipos de unión. Se adopta una rosca laminada dado que son el método más predominante a la hora de formación de roscas. Estos espárragos siguen la normativa DIN 976.

- En el caso en que no se presenten síntomas de corrosión en los espárragos ni se les hubiera precargado con un excesivo par de apriete:

- Si los espárragos se hubiesen precargado con una precarga perteneciente a un 90% del límite de proporcionalidad, es decir, la precarga recomendada, no se hubiera producido jamás el colapso de la atracción.
- Si los espárragos en lugar de haber sido precargados con un 90% del límite de proporcionalidad se hubiesen precargado con un 90% del límite elástico, el anclaje tampoco hubiese fallado.

Lo que es cierto, es que estas circunstancias mencionadas anteriormente no se han producido dado que sino el Péndulo todavía estaría en servicio, por tanto, es necesaria la realización de otras hipótesis adicionales. También es cierto que los casos que se han presentado no han sido realistas debido a que en el anclaje sí se apreciaban síntomas de corrosión, por tanto, se debía de tener en cuenta y además, en la práctica los pernos se precargan aproximadamente un 110% del límite elástico con la finalidad de obtener una plastificación de los mismos y de esta forma obtener un mayor abrace entre la rosca de los pernos y las tuercas.

- A continuación se presentan otras hipótesis más realistas de lo que pudo suceder:
  - En el caso en que únicamente se hubiese presentado un exceso en la precarga de los espárragos, esta debía de ser de un 129% del límite de proporcionalidad o lo que es lo mismo el 117% del límite elástico para que el anclaje tuviera una duración de 4 años.
  - Si la falla únicamente hubiese sido debida a la presencia de corrosión, habiéndose precargado los pernos tal y como se recomienda, es decir, al 90% del límite de proporcionalidad, para saber que el anclaje no tenía una duración de vida infinita sino de 4 años, el límite de resistencia a fatiga se habría tenido que reducir de 129 MPa a 10 MPa, debiéndose haber considerado en el diseño un factor de reducción de efectos varios en el límite de resistencia a fatiga de  $k_g=0,077$  con la finalidad de que la atracción hubiera estado en pie en un periodo de tiempo de 4 años.

Al igual que sucedía en las primeras hipótesis planteadas, estas tampoco terminan de ser del todo realistas dado que se ha considerado que la presencia de corrosión y un exceso en la precarga se dan por separado, por tanto, a continuación se presenta la última de las hipótesis y por tanto la más realista de todas, es decir:

- El fallo del anclaje se produjo debido a una combinación de un par de apriete superior al recomendado, es decir de un 110% del límite elástico en lugar del 90% del límite de proporcionalidad junto con la presencia de corrosión. En este caso, para saber que el anclaje no tenía una duración de vida infinita sino de 4 años, el límite de resistencia a fatiga se habría tenido que reducir de 129 MPa a 46 MPa por lo que debería de haberse considerado en el diseño un factor de reducción de efectos varios en el límite de resistencia a fatiga de  $k_g=0,36$  con la finalidad de que la atracción hubiera estado en pie en un periodo de tiempo de 4 años.

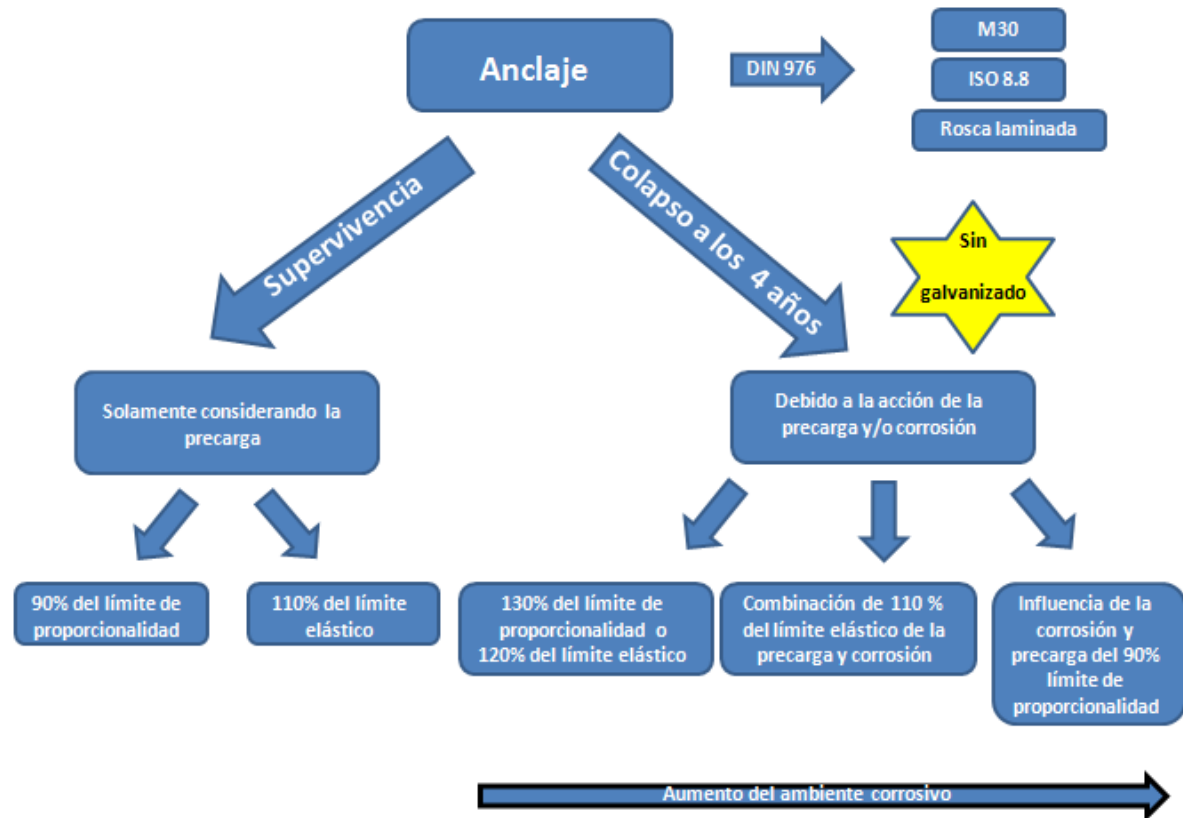
De forma análoga y con las mismas explicaciones pero tan solo cambiando los parámetros oportunos, se obtienen las siguientes conclusiones en la **Tabla 4** para el caso en que la base estaba inclinada un cierto ángulo. Para mayor información acerca de este ángulo, consúltase el segundo anexo correspondiente a los esfuerzos absorbidos por los espárragos.

Métrica	M30				
Calidad acero	ISO 8.8				
Rosca	Laminada				
Normativa	DIN 976				
Caso 1. Supervivencia del anclaje. Hipotético caso: sin la presencia de un excesivo par de apriete ni presencia de corrosión					
	$\sigma_{\text{precarga}}$ (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$\sigma_{\text{precarga}}/\sigma_u \cdot 100$	Par de apriete (N·m)	Duración (años)
1.1. Supervivencia con una precarga del 90% del límite de proporcionalidad, es decir la recomendada	540	129	65	1818	Infinita
1.2. Supervivencia con una precarga del 90% del límite elástico	594	129	72	1999	Infinita
1.3. Supervivencia con una precarga del 110% del límite elástico	726	129	87	2444	Infinita
Caso 2. Falla del anclaje. Caso más realista.					
	$\sigma_{\text{precarga}}$ (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$\sigma_{\text{precarga}}/\sigma_u \cdot 100$	Par de apriete (N·m)	Duración (años)
2.1. Falla producida únicamente por un exceso en la precarga de un 129 % del límite de proporcionalidad o lo que es lo mismo 117% del límite elástico	780	129	94	2614	4
2.2. Falla producida por la presencia de corrosión con $k_g=0,07$ y una precarga del 90% del límite de proporcionalidad	540	9	65	1818	4
2.3. Falla producida por la combinación de una precarga del 110% del límite elástico y la presencia de corrosión con $k_g=0,36$	726	46	87	2444	4

**Tabla 4.** Tabla resumen en la que se indican las hipótesis que pudo dar lugar al colapso de la atracción para la consideración de la base inclinada un cierto ángulo respecto al suelo.

Todas las consideraciones realizadas para el caso en el cual se considera la presencia de corrosión, se realiza bajo la conjetura de que a los espárragos no se les ha aplicado un galvanizado, tal y como se ha demostrado en el tercer anexo perteneciente al análisis a fatiga.

Véase la **Figura 30** como esquema resumen de las conclusiones obtenidas:



**Figura 30.** Esquema resumen de las conclusiones



# CAPÍTULO 7:

# BIBLIOGRAFÍA

## 7.1. Referencias bibliográficas

- American Galvanizers Association. "Service Life Chart for Hot-Dip Galvanized Coatings".
- A.J. Besa, E. Giner, J.J. Ródenas, J.E. Tarrancon y F.J. Valero. 2003. Componentes de máquinas. Fatiga de alto ciclo. Problemas y ejercicios resueltos. Madrid: Pearson / Prentice Hall.
- C. Preciado. 2004. Normalización del dibujo técnico. San Sebastián: editorial Donostiarra.
- Lambda Technologies. 2007. "Reducing corrosion fatigue and scc failures in 300m steel landing gear using low plasticity burnishing". Los Angeles: SAE AeroTech Congress & Exhibition.
- M.Paz. 1992. Dinámica estructural. Barcelona: Reverté.
- Richard G. Budynas. y J. Keith Nisbett. 2008. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Mexico: McGraw-Hill.

## 7.2. Bibliografía de consulta

- American Galvanizers Association. "Service Life Chart for Hot-Dip Galvanized Coatings".
- A.J. Besa, E. Giner, J.J. Ródenas, J.E. Tarrancon y F.J. Valero. 2003. Componentes de máquinas. Fatiga de alto ciclo. Problemas y ejercicios resueltos. Madrid: Pearson / Prentice Hall.
- C. Preciado. 2004. Normalización del dibujo técnico. San Sebastián: editorial Donostiarra.
- D.Sánchez. y R.González. 2011. Cálculo de elementos estructurales. Barcelona: Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC.
- E.Torrecilla. 2010. El gran libro de Catia. Barcelona: Marcombo.
- Ferdinand P Beer., E. Russell Johnston, JR. y William E. Clausen. 2007. Mecánica vectorial para ingenieros. Dinámica. Mexico: McGraw-Hill.
- J.M. Rodríguez. 1989. Curso aplicado de cimentaciones. Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.
- Lambda Technologies. 2007. "Reducing corrosion fatigue and scc failures in 300m steel landing gear using low plasticity burnishing". Los Angeles: SAE AeroTech Congress & Exhibition.
- M.Paz. 1992. Dinámica estructural. Barcelona: Reverté.
- Richard G. Budynas. y J. Keith Nisbett. 2008. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Mexico: McGraw-Hill.



## 7.3. Referencias web

- Agencias. "La empresa de mantenimiento de 'El Péndulo' del Tibidabo defiende la actuación de sus operarios.". (20 Julio 2010). <http://www.diariodenavarra.es/> (último acceso Junio 13, 2012).
- EFE. "El informe del Ayuntamiento de Barcelona sobre 'El Péndulo' señala fallos de fabricación.". (21 Junio 2011). [http://www.elpais.com /](http://www.elpais.com/) (último acceso Junio 13, 2012).
- El País. "Un operario vio que saltaban tornillos de 'El Péndulo' antes del accidente.". (15 Abril 2011). [http://www.elpais.com /](http://www.elpais.com/) (último acceso Junio 13, 2012).
- El País. "La juez imputa al dueño de la empresa que hizo 'El Péndulo'.". (12 Octubre 2011). <http://www.elpais.com/> (último acceso Junio 13, 2012).
- J.G.Albalat. "La jueza comprueba que el anclaje de 'El Péndulo' estaba muy oxidado.". (31 Julio 2010). <http://www.elperiodico.com/> (último acceso Junio 13, 2012).
- J.G.Albalat. "El informe del ayuntamiento apunta fallos de fabricación de 'El Péndulo'.". (22 Junio 2011). [http://www.elperiodico.com /](http://www.elperiodico.com/) (último acceso Junio 13, 2012).
- J.G.Albalat. "El diseño original de 'El Péndulo' del Tibidabo fue manipulado.". (12 Octubre 2011). [http://www.elperiodico.com /](http://www.elperiodico.com/) (último acceso Junio 13, 2012).
- LI.Sierra. y E.Figueroa. "El Tibidabo cambió este mes de empresa de mantenimiento.". (20 Julio 2010). <http://www.lavanguardia.com/> (último acceso Junio 13, 2012).
- Redacción. "El ex encargado de 'El Péndulo' se extraña de que no hubiera sucedido una desgracia antes.". (19 Julio 2010). <http://www.lavanguardia.com/> (último acceso Junio 13, 2012).
- R.Carranco. "La base de la atracción que cayó en el Tibidabo era insuficiente.". (19 Julio 2010). <http://www.elpais.com/> (último acceso Junio 13, 2012).
- S.Tarin. "El Péndulo del Tibidabo cayó por la mala construcción de la atracción.". (24 Noviembre 2010). <http://www.lavanguardia.com/> (último acceso Junio 13, 2012).
- Sucesos. "El Colegio de Ingenieros aún no ha podido analizar los tornillos del Péndulo.". (04 Marzo 2011). [http://newscaster.ikuna.com /](http://newscaster.ikuna.com/) (último acceso Junio 13, 2012).
- <http://www.tv3.cat>
- <http://www.youtube.com>
- <http://www.btv.cat>
- <http://www.soloingenieria.net/foros/viewtopic.php?f=7&t=28596>
- [http://www.fea-optimization.com/ETBX/stresslife\\_help.html](http://www.fea-optimization.com/ETBX/stresslife_help.html)

